



ROOTTORIPROTOTYYPPIEN VALMISTUKSEN MENETELMÄSUUNNITTELU

Jali Leppälä

Opinnäytetyö
Lokakuu 2011
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kone- ja laiteautomaatio
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

LEPPÄLÄ, JALI: Roottoriprototyyppien menetelmäsuunnittelu

Opinnäytetyö 34 s.
Lokakuu 2011

Gardner Denverin roottorivalikoima tulee kokemaan tulevina vuosina suuria uudistuksia uuden GD-malliston myötä. Tampereen tehdas tunnetaan laadukkaiden ruuvikompressoreiden valmistajana, ja tämän GD4-prototyyppiprojektin onnistumisella on suuri merkitys tulevien mallien valmistuksen saamisessa Tampereen tehtaalle.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella menetelmät prototyyppiroottoreiden eri työvaiheille sekä edelleen kehittää menetelmiä myöhemmin alkavaa sarjatuotantovaihetta varten. Työhön sisältyi viikon mittainen koulutusjakso Englannissa, jonka aikana käytiin läpi tarvittavat toimenpiteet roottoriprofiilien muokkaamiseksi muotohiomakoneelle. Myös projektin muut vaiheet vaativat paljon valmistelua ja suunnittelua. Projektin onnistuminen edellytti tiivistä yhteistyötä valmistuksen sekä lopputarkastuksen kanssa.

Työn suurin haaste oli roottoriprofiilin muuntaminen työkalukoordinaateiksi HPMS-ohjelmalla. Kyseinen vaihe vaati paljon aikaa ja paneutumista. Myös tarvittavien kiinnittimien onnistunut suunnittelu ja erityisesti niiden hankkiminen projektille annetussa aikataulussa oli haasteellista.

Roottoriprototyypit onnistuivat laadullisesti erinomaisesti ja tiukasta aikataulusta huolimatta etuajassa. Suuria vastoinkäymisiä ei tullut vastaan missään projektin vaiheessa, ja projekti sujui suunnitellusti. Roottoreiden valmistuksen aikana tehtyjen huomioiden perusteella laadittiin suunnitelmat työmenetelmien kehittämiseksi myöhemmin alkavaa sarjatuotantoa varten. Opinnäytetyön lopputuloksena on selvitys projektin eri vaiheista alkaen huolellisista alkuvalmisteluista päättyen valmiin prototyypin mittaustulosten analysointiin sekä menetelmien jatkokehitysehdotuksiin.

Tämä on opinnäytetyön julkinen versio. Opinnäytetyön liitteet ovat luottamuksellisia, eikä niitä ole esitetty työn julkisessa versiossa.

Avainsanat: Roottori, prototyyppi, ruuvikompressori, menetelmäsuunnittelu

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
TAMK University of Applied Sciences
Mechanical and production engineering

LEPPÄLÄ, JALI: Production methods of the prototype rotors

Bachelor's thesis 34 pages
October 2011

Gardner Denver's portfolio of the rotor models will experience major changes in the near future. The new GD-series will be launched step by step. The Tampere factory is known for manufacturing high-quality screw compressors and GD4-prototype project's success has a significant impact on getting future prototypes and production models to Tampere.

The purpose of this work was to design production methods for the prototype of the GD4 rotors, whose manufacturing consists of four different work phases. The second target was to make method suggestions for the mass production phase, which is scheduled to start at the beginning of the year 2012. An essential part of the work was a one week-long training period in England, which created the basis for the handling of rotor profiles. Also other phases of the project required a considerable amount of background work. The project involved close cooperation with the rotor manufacturing and the final inspection.

The conversion of the rotor profile to tool coordinates with HPMS-program was one of the projects biggest challenges. This step required a considerable amount of time and dedication. Designing required fasteners and acquiring those in the given time schedule was also a challenge.

The rotor prototypes were qualitatively excellent, and despite the tight schedule, the prototypes were completed ahead of schedule. There were no major setbacks at any stage of the project and the project proceeded as planned. Based on the notes that were made during prototype manufacturing, we made plans to further develop work methods for later starting mass production phase.

This is a public version of the thesis. The thesis includes also confidential information that is not presented in this public version.

Keywords: Rotor, prototype, screw compressor, production methods

ESIPUHE

Tämä työ suoritettiin Gardner Denver Oy:llä, Tampereella Messukylässä. Haluan kiittää työni ohjaajaa Markus Ahoa ja työpaikalla valvojaani Vesa Kanasta, molempien apu on ollut minulle arvokasta. Kiitos kuuluu myös tuotantopäällikkö Kai Piiraiselle projektiin liittyvistä taustatiedoista sekä koko pienten roottoreiden ja laadunvalvonnan henkilöstölle projektin ensiluokkaisesta läpiviennistä.

Tampereella 11.7.2011

Jali Leppälä

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	6
2 GARDNER DENVER OY.....	8
3 RUUVIKOMPRESSORIN TOIMINTAPERIAATE.....	9
3.1 Öljyvoideltu ruuvikompressori.....	10
3.1.1 Öljynerotus.....	11
3.2 Roottoriprofiilit.....	12
3.3 Profiilin ominaisuuksia.....	13
4 PROTOTYYPIN VAIHEISTUS JA TYÖMENETELMÄT	15
4.1 Aihiot.....	15
4.2 Sorvaus	16
4.3 Muodon avaus.....	18
4.4 Pyöröhionta.....	22
4.5 Muodon viimeistely	23
4.5.1 Työkaluprofiilin luominen HPMS-ohjelmalla.....	23
4.5.2 Roottoreiden viimeistelyhionta.....	26
5 LOPPUTARKASTUS	28
5.1 Koordinaattimittaus.....	28
5.2 Välystarkastelu.....	31
5.3 Koekäyttö.....	31
6 HAVAITUT ONGELMAT JA MUUTOKSET SARJATUOTANTOON.....	32
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	33
LÄHTEET	34

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee täysin uuden tuotteen menetelmäsuunnittelua, sen valmistamista ja menetelmien jatkokehittämistä sarjatuotantoon soveltuvaksi. Tutkintotyö on tehty Gardner Denver Oy:n Tampereen tehtaan pienten roottoreiden osastolle.

Opinnäytetyö tehdään osana GD4-projektia, joka alkoi huhtikuussa 2011. Opinnäytetyön sekä koko projektin tavoitteena oli suunnitella työmenetelmät roottoreiden valmistukseen ja saada kuusi roottoriparia lähtemään Gardner Denverin Saksan tehtaalle, Simmerniin viikolla 27. Johtuen kireästä aikataulusta työssä ei ollut varaa viivästyksiin, vaan kaiken piti olla suunniteltu erittäin huolellisesti etukäteen. Opinnäytetyön toisena tavoitteena oli laatia kehitysehdotukset työmenetelmiin vuoden 2012 alussa alkavaan sarjatuotantovaiheeseen.

Roottoriprofiili on suunniteltu Gardner Denverin Simmernin toimipisteessä Saksassa, joten profiilisuunnitteluun en tule perehtymään tässä työssä.

Uusi yksikkömalli GD4 on ensimmäinen askel kohti uutta yhtenäisempää tuoteperhettä. Tällä hetkellä Gardner Denverillä on Tampereen, Simmernin ja Sedalian tehtaat yhteenlaskettuna aktiivituotannossa 55 erilaista roottoriprofiilia. Näistä suuri osa on enemmän tai vähemmän päällekkäisiä malleja. Uusi GD-tuoteperhe tulee käsittämään mallit GD1-GD11, joista mallit GD2-GD10 kattavat nykyiset roottorikoot. Malli GD1 tulee siis olemaan hieman pienempi kuin pienin tällä hetkellä tuotannossa oleva ja malli GD11 vastaavasti hieman suurempi. Näistä GD1-ruuviroottorin eli urospuoleisen roottorin halkaisija on 55 millimetriä ja suurimman GD11-ruuviroottorin vastaava mitta on 350 millimetriä.

Uudet ruuvikompressoriyksiköt ovat teknisesti paranneltuja nykyisistä malleista ja tulevat olemaan edullisempia valmistaa. Yhtenäisemmällä ja tiiviimmällä tuoteperheellä saavutetaan volyymietu muun muassa valuosien, laakereiden ja tiivisteiden ostossa. Lisäksi uudet yksiköt on suunniteltu siten, että ei tarvita erikoislaakereita vaan laakerit ovat pääasiassa autoteollisuuden käyttämiä massatuotantolaakereita. Uusilla roottorimalleilla saadaan yhtenäistettyä myös niiden nimeämistapa. Esimerkiksi GD4-mallia vastaavat nykytuotteet ovat Simmernin valmistama EK123 ja Tampereella tuotannossa

oleva Enduro 12. Ek-roottoreissa 123 tarkoittaa ruuviroottorin halkaisijaa millimetreissä eli 123 millimetriä. Sen sijaan Enduroissa luku tulee teoreettisesta kierrostilavuudesta, tässä tapauksessa 1,2 litraa.

Nykyisestä roottoreiden suuresta tuotevalikoimasta johtuen, suurimpaan osaan malleista vain yhdellä tehtaalla on valmiudet niiden valmistamiseen. Tuleva mallisto tulee helpottamaan myös tätä ongelmaa, sillä tavoitteena on että jokaista mallia voidaan valmistaa vähintään kahdessa eri tehtaassa. Uusia malleja on suunniteltu aloitettavaksi noin kaksi mallia vuotta kohden. Mallien sarjatuotantovaihe on tarkoitus aloittaa noin puoli vuotta prototyyppien jälkeen. Uusien mallien olisi tarkoitus korvata vanhat pääosin noin kahdessa vuodessa ja syrjäyttää ne kokonaan 5-10 vuodessa.

GD4-prototyyppiyksikön kohdalla työnjako on tehty siten, että prototyyppirottorit valmistetaan Tampereella ja niiden runko-osien valmistus sekä yksikön lopputestit tehdään Simmernissä, Saksassa. Varsinainen sarjatuotanto tapahtuu pääosin Tampereella (Piironen 2011).

2 GARDNER DENVER OY

Tampereen tehtaan historia alkaa vuodelta 1963, jolloin Tampella solmi lisenssisopimuksen SRM:n eli Svenska rotormaskinerin kanssa ruuvikompressoreiden valmistuksesta. Samana vuonna myös ensimmäinen ruuvikompressori valmistettiin. Vuonna 1990 kompressoriosasto yhtiöitettiin ja nimi Tamrotor otettiin käyttöön. Vuodesta 1997 alkaen yritys on ollut amerikkalaisyhtiö Gardner Denverin omistuksessa.

Tänä päivänä Tampereen Messukylän tehtaalla on noin 180 työntekijää ja liikevaihto vuonna 2010 oli 43,9 miljoonaa euroa. Yhtiön päämarkkinat ovat yksiköiden ja komponenttien suoramyynti OEM-asiakkaille maailmanlaajuisesti, kompressorimyynti yli 40 maahan sekä marine- ja offshore -myynti norjalaisen yhteistyöyrityksen kautta.

Tampereen tehtaan lisäksi Gardner Denver valmistaa ruuvikompressoreita Simmernin tehtaalla Saksassa sekä Sedaliassa, Yhdysvalloissa (GD-akatemia 2011).

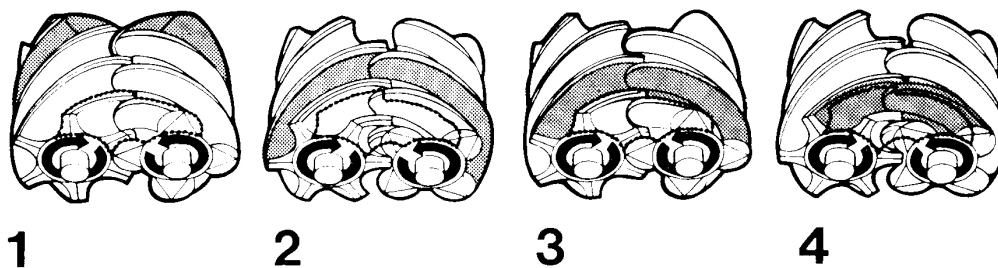
3 RUUVIKOMPRESSORIN TOIMINTAPERIAATE

Nykyisessä muodossaan ruuvikompressor on syntynyt 1930-luvulla. Sen varsinaisena kehittäjänä pidetään ruotsalaista Alf Lysholmia. Ensimmäiset ruuvikompressorit rakennettiin tuottamaan öljytöntä ilmaa (Öhman 2001, 3)

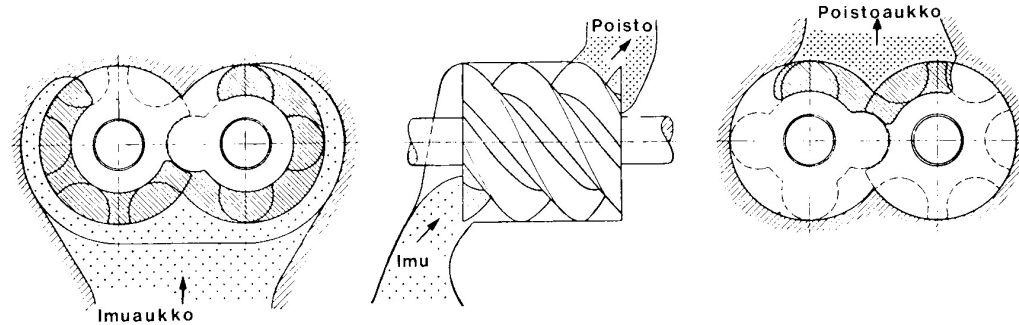
Puristus tapahtuu ruuvi- ja luistiroottorin väliin jäävissä urissa, joiden ulko- ja päätypinnat roottoreiden ympärillä oleva rungon muodostama pesä tiivistää.

Puristus kulkee kuvion 1 mukaisesti ruuvikompressorissa. Roottoreiden ympärillä on todellisuudessa pesä, joka roottoreiden urien kanssa muodostaa puristustilan.

1. Ruuvikompressorin puristustilan muodostavat kaksi toistensa kanssa rynnöissä olevaa roottoria, joita kompressorin runko ympäröi. Rungossa olevan imuaukon (kuvio 2) kautta roottorit imevät ilmaa hampaiden väliin roottorien urien ollessa imuaukon kohdalla.
2. Kun roottorit pyörivät, hampaiden ryntökohta siirtyy niin, että yhteys imuaukkoon loppuu ja ilma jää suljettuun tilaan.
3. Seuraavan pyörinnän kuluessa pienenee hampaiden välisen tilan muodostama tilavuus ja imetty ilma alkaa puristua.
4. Kun tuottopaine on saavutettu, paineilma virtaa poisto- eli paine-aukon (kuvio 2) kautta säiliöön (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 30)



KUVIO 1. Puristuksen kulku ruuvikompressorissa (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 30)



KUVIO 2. Ruuvikompressorin imu- ja poistoaukkojen sijainti (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 34)

3.1 Öljyvoideltu ruuvikompressor

Öljyttömissä ruuvikompressoreissa roottorit eivät kosketa toisiaan, vaan niiden välillä sekä pesän pinnalla on muutaman sadasosamillimetrin suuruinen vällys. Teho roottoreihin johdetaan ruuviroottorin akselilta, jolloin luistiroottorille teho siirretään tahdistushammaspyörävälityksen kautta, jotta vällys roottoreiden välillä säilyy.

Kaikki Gardner Denverin Tampereen tehtaalla valmistettavat ruuvikompressorit ovat yksivaiheisia öljyvoideltuja, kuten myös tuleva GD-mallisto. Toisin kuin öljyttömissä ruuvikompressoreissa, öljyvoidelluissa ei yleensä käytetä erillisiä tahdistushammaspyöriä, vaan teho roottorista toiseen siirtyy suoraan roottoreiden pintojen välityksellä.

Öljyvoidellut ruuvikompressorit ovat useimmiten ruuviroottorivetoisia, mutta joissakin pienehköissä yksiköissä voidaan käyttää myös niin sanottua luistikäyttöä, jolloin tehonsiirto kompressorin tapahtuu luistiroottorin akselin kautta. Luistikäytön avulla ruuviroottorin pyörimisnopeus saadaan korkeammaksi tarvitsematta turvautua ylennysvaihteeseen (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 31)

Ruuvikompressorin ilmantuotto voidaan arvioida seuraavasta lausekkeesta (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 32):

$$\dot{V} = \eta_v CLZ_M (A_M + A_F) n_M, \text{ jossa}$$

C = uran täyttymisaste (yleensä 0,9-1,0)

L = roottorin pituus

Z_M = ruuviroottorin harjanteiden lukumäärä

A_M = ruuviroottorin poikkileikkauksen ilmapinta-ala

A_F = luistiroottorin poikkileikkauksen ilmapinta-ala

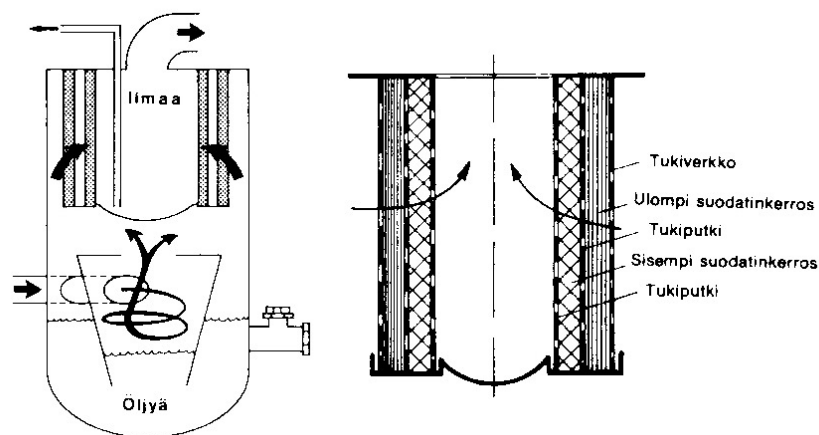
n_M = ruuviroottorin käyntinopeus

η_v = tuottosuhte (yleensä 0,85-0,90)

Voidellussa ruuvikompressorissa puristustilaan ruiskutetaan jatkuvasti öljyä noin yksi tilavuusprosentti ilman määrästä. Öljyn tehtävänä on vuotojen tiivistys, roottoreiden voitelu sekä puristuslämmön pois johtaminen.

3.1.1 Öljynerotus

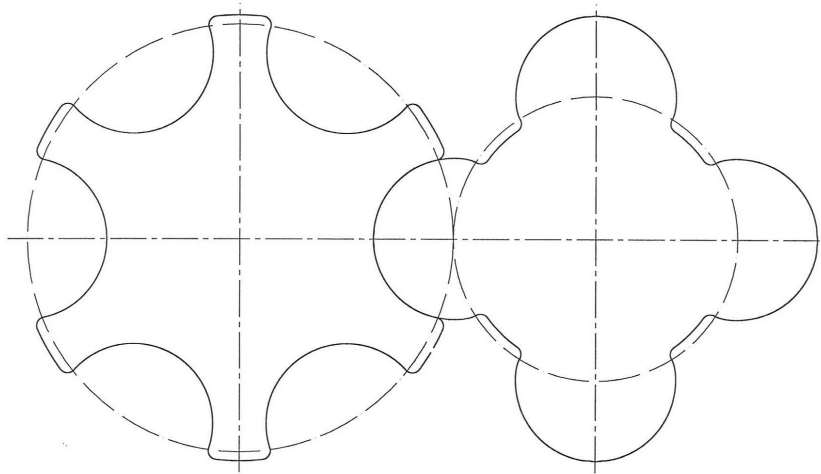
Voiteluöljy on puristuksen jälkeen erotettava paineilmasta öljynerottimessa, joka on yleensä esi- ja hienoerottimen yhdistelmä (kuvio 3). Esierotus tapahtuu ilman ja öljyn tiheyseron perusteella mekaanisesti. Hienoerotukseen käytetään kuituerotinta. Erotuksen jälkeen öljy joudutaan jäähdyttämään, koska puristuslämmöstä 60 - 80 % kulkeutuu öljyn mukana ulos kompressorista (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 32).



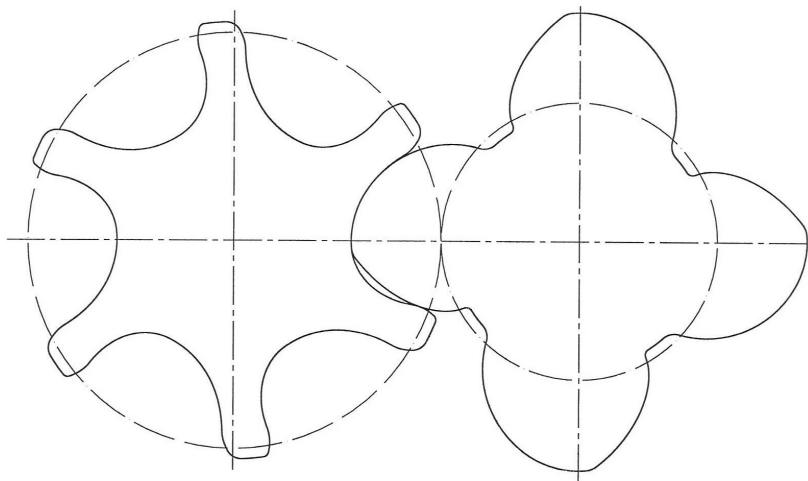
KUVIO 3. Ruuvikompressorin öljynerotusjärjestelmä (Airila, Hallikainen, Kääpä & Laurila 1983, 32)

3.2 Roottoriprofiilit

Ensimmäinen ruvikompressoripatentti on peräisin vuodelta 1878, mutta vasta 1930- ja 1940 -luvuilla kehitetyt roottoriprofiilit olivat ensimmäisiä, joita pystyttiin valmistamaan sarjatuotantona. Aina 1970-luvulle asti valmistetut symmetriset profiilit (kuvio 4) olivat kuitenkin hyötysuhteeltaan heikkoja ja roottoriprofiilien suurena läpimurtona voidaan pitää 1960-luvun lopulla kehitettyjä epäsymmetrisiä profiileja (kuvio 5). (Öhman 2001, 3)



KUVIO 4. Ensimmäinen symmetrinen profiili. Ruuviroottori oikealla (Öhman 2001, 13)



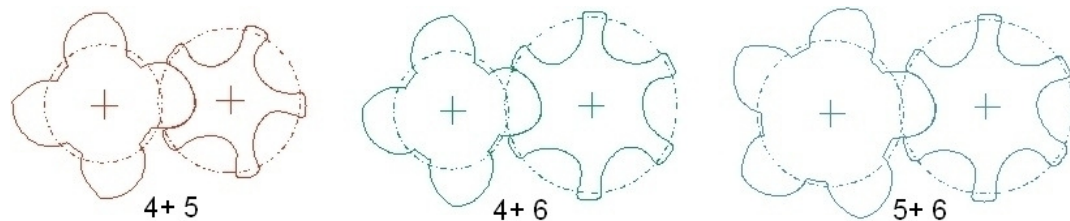
KUVIO 5. Epäsymmetrinen SRM:n D-profiili (Öhman 2001, 17)

Toisin kuin symmetrisessä profiilissa, nykyaikaisissa epäsymmetrisissä profiileissa on selvästi erotettavissa hampaan kyljistä loiva ja jyrkkä kylki.

3.3 Profiilin ominaisuuksia

Roottoriprofiilia suunniteltaessa on otettava monia asioita huomioon, kuten puristettava kaasu, voitelu, roottoreiden ja runko-osien materiaali, puristussuhde ja käyttö kierrokset. Myös muodon viimeistelymenetelmä määrittelee hyvin pitkälle roottoreiden mahdollisia ominaisuuksia. Yleisimpiä ovat muotoon timantoidulla hiomakivellä hiominen ja muototerälapuilla jyrsiminen. Esimerkiksi teräviä kulmia ja pieniä säteitä ei pystytä tekemään hiomalla.

Ruuvi- ja luistiroottorin hammaslukumäärä vaikuttaa huomattavasti roottoreiden halkaisijaan, keskiöetäisyyteen ja jonkin verran myös ominaistehon tarpeeseen. Kuviossa 6 on havainnollistettu tietyn roottoriparin yleisimpien hammaslukukombinaatioiden vaikutusta roottoreiden kokoon, keskiöetäisyyteen ja pituuden suhdetta halkaisijaan.

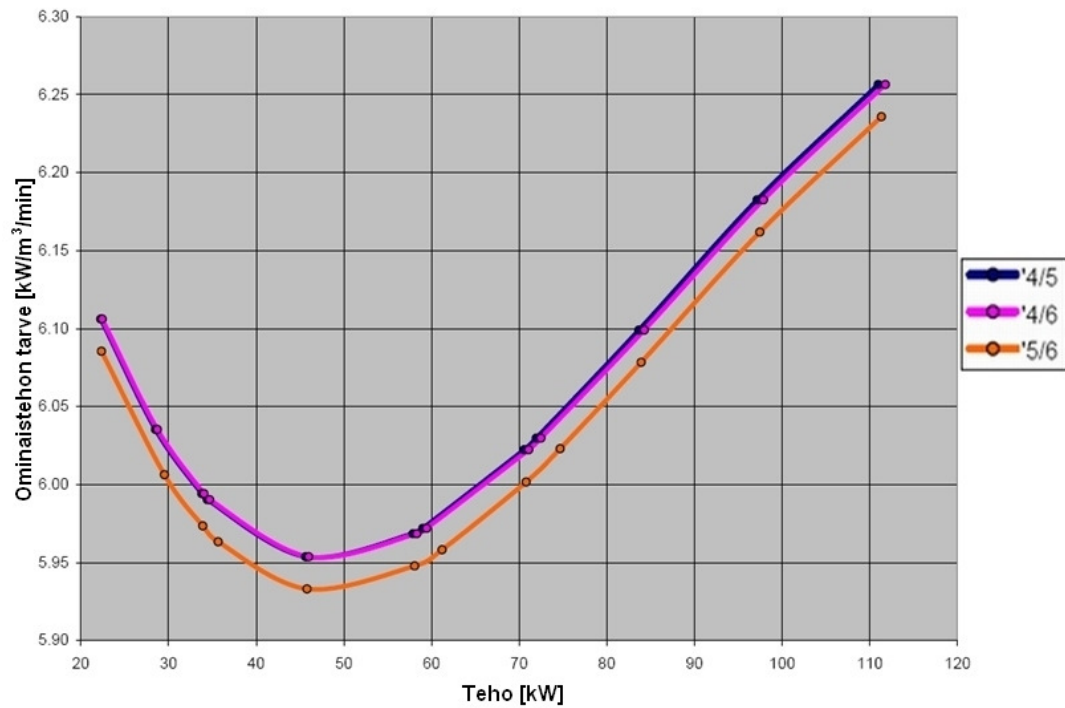


Hammaslukumäärä	Ruuviroottorin halkaisija (mm)	Luistiroottorin halkaisija (mm)	Keskiöetäisyys (mm)	L / D
4 / 5	286	233,5	203	1,42
4 / 6	275	266,6	215	1,56
5 / 6	288	240	212	1,47

KUVIO 6. Roottoreiden yleisimmät hammaslukumääräkombinaatiot (GD-akatemia 2011)

Nykyisissä Gardner Denverin Tampereen tehtaan valmistamissa roottoreissa käytetään pääasiassa 4/5-kombinaatiota. Tulevat GD -roottorit ovat kaikki suunniteltu 5/6-

hampaisiksi, johtuen sen pienemmästä ominaistehon tarpeesta verrattuna muihin yleisiin hammaslukumääräkombinaatioihin (kuvio 7).



KUVIO 7. Ominaistehon tarve eri hammaslukuyhdistelmillä (GD-akatemia 2011)

4 PROTOTYYPIN VAIHEISTUS JA TYÖMENETELMÄT

Roottoreiden valmistus on Gardner Denverillä jaoteltu kahteen eri valmistussoluun. Pienten roottoreiden solussa valmistetaan enduro-mallit E3, E6, E12 ja E25. Näistä E25 on isoin noin 155 millimetrin halkaisijallaan. Valmistuksessa on neljä eri työvaihetta. Isojen roottoreiden linjalla valmistus tapahtuu 5-6:nessä eri vaiheessa ja mallit ovat E75, E175 ja A321. Näistä suurin A321 on nimetty ruuviroottorin halkaisijan mukaan ja Enduro-sarja siis teoreettisen kierrostilavuuden mukaan.

Uusi GD4-roottoripari on hyvin lähellä Enduro 12 kokoa. Se valmistetaan pienten roottoreiden linjalla neljässä eri vaiheessa, jotka ovat sorvaus pyörötangosta, muodon avausjyrsintä, akseleiden sekä muodon harjan pyöröhionta ja lopuksi muodon viimeistelyhionta.

Ensimmäiset prototyyppikuvat saimme Tampereelle huhtikuussa 2011, joista lopulliset kuvat tulivat vielä hieman eroamaan. Roottoreiden toimitukseen oli tässä vaiheessa noin kaksi kuukautta aikaa ja ensimmäisten versioiden pohjalta oli aloitettava kartoittamaan tarvittavia kiinnittimiä eri työvaiheisiin, sillä akseleiden halkaisijat olivat kuitenkin lopulliset. Erityisesti muotohiomakoneen kiinnittimet oli saatava mahdollisimman nopeasti suunniteltua ja tilattua pitkien toimitusaikojen vuoksi.

4.1 Aihiot

Ennen aihoiden tilaamista ja mitoittamista oli tehtävä päätös siitä, että tilataanko pyörötangot vain oikeaan mittaan katkaistuna vai myös keskiöitynä ja esikoneistettuna. Tällä hetkellä kaikki roottorimallit sorvataan esikoneistetusta pyörötangosta, mutta muutamia malleja on onnistuneesti sorvattu myös katkaistusta aihioista ja kyseiseen menetelmään siirrytään vähitellen kaikissa pienissä roottoreissa.

Prototyyppien materiaalivaatimusten perusteella totesimme, että voimme käyttää samaa HYDAX 15 materiaalia (Tibnor 2011, 156), kuin mitä käytämme nykyroottoreihinkin pienten roottoreiden linjalla.

Projektin tiukan aikataulun vuoksi päädyimme esikoneistettuun aihioon (kuvio 8), johon on sorvattu tartuntapinta sorvin leuoille sekä tasattu ja keskiöity päät. Aihiota tilasimme 10 kappaletta sekä ruuvi- että luistiroottorille.



KUVIO 8. Aihiot valmiina sorvaukseen, vasemmalla ruuviroottorit (kuva: Jali Leppälä)

4.2 Sorvaus

Sorvausvaiheeseen löytyi talon sisältä kuviossa 3 näkyvät tukilaakeri, kärki ja sopivat leuka-aihiot, jotka sorvattiin oikealle tartuntahalkaisijalle (kuviot 9 ja 10). Uusia työkaluja ei tarvittu.

Vaihekuviin lisättiin tarvittavat työvarat pyöröhionnalle ja muutettiin R_z - pinnankarheusmerkinnät tutumpaan R_a -muotoon kuvion 11 avulla.

Aihiot saapuivat kesäkuun puolessavälissä ja ohjelmointi sekä koneistus aloitettiin välittömästi Mazak Integrex 400 IV-monitoimisorvilla (Wihuri työstökoneet). Vielä muutama päivää ennen sorvauksen aloittamista roottoreihin tuli pieniä muutoksia kiila- ja öljyuran paikkoihin. Ohjelmoinnissa ei ilmennyt suurempia ongelmia ja materiaalinkin ollessa tuttu, voitiin käyttää vanhoja työstöarvoja. Sorvausvaiheessa huomattiin heti aluksi, että aihiot eivät olleet aivan tasamittaisia ja ne olivat heitollisia kärkien välissä. Tästä johtuen oli muutamien aihioden kanssa hankaluuksia saada akseleiden pituuksia

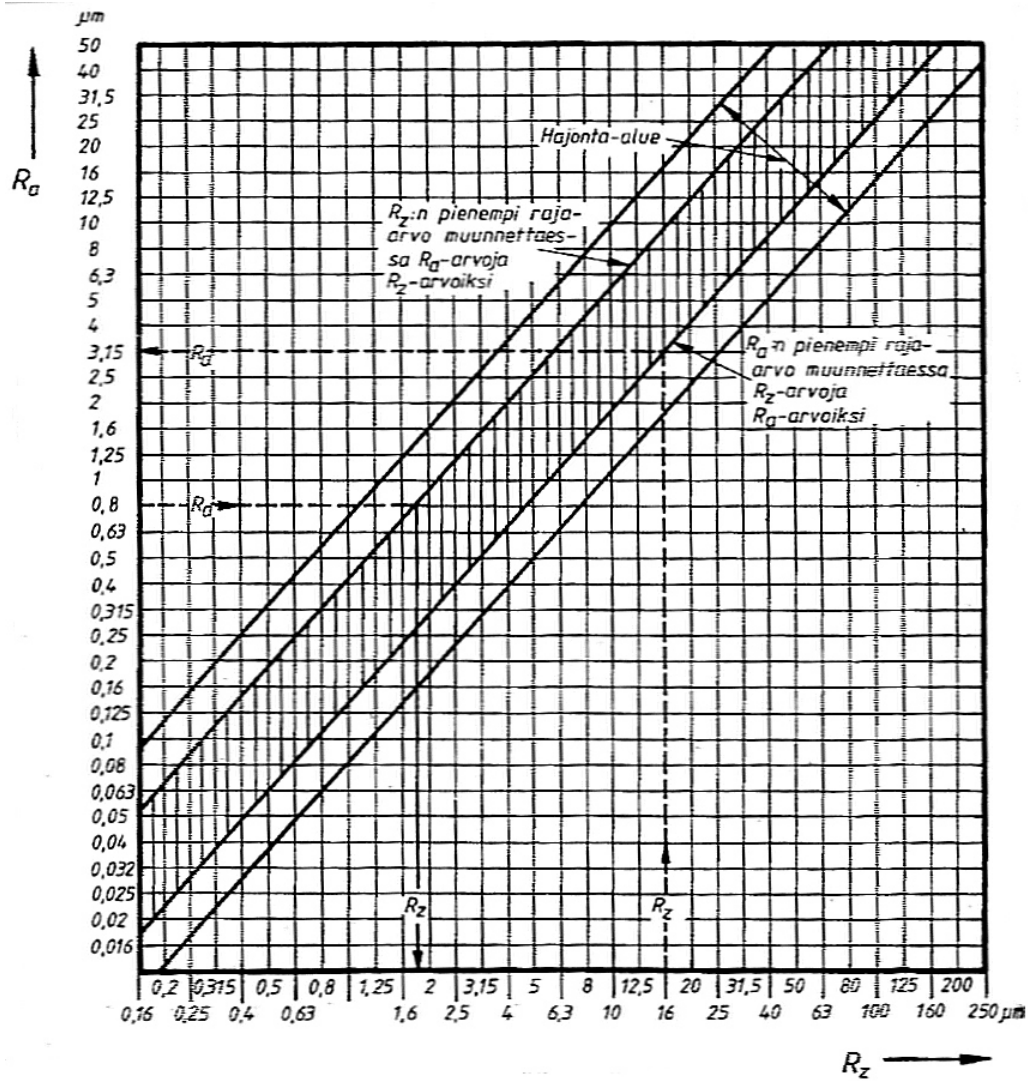
piirustusten mukaisiksi. Heitollisuudesta johtuen, kahteen valmiiksi sorvattuun rootto-
riin jäi raakaa pintaa.



KUVIO 9. Puolivalmis ruuviroottori sorvissa (kuva: Jali Leppälä)



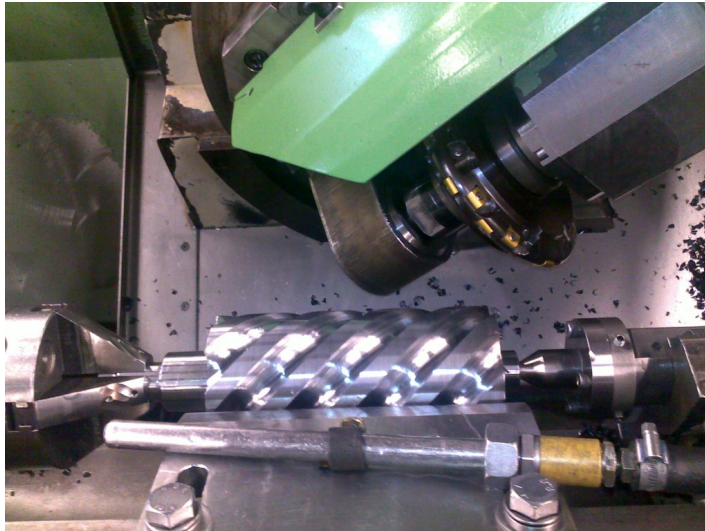
KUVIO 10. Valmiiksi sorvattu luistiroottori (kuva: Jali Leppälä)



KUVIO 11. R_a :n ja R_z :n välinen riippuvuus (Hyväri 2005)

4.3 Muodon avaus

Muodon avauksessa oli alusta asti selvää, että muoto jouduttaisiin avaamaan olemassa olevilla avausterillä (kuvio 12). Avausterien teettäminen kestää useita kuukausia ja siihen ei tässä projektissa ollut aikaa. Terät teetetään kokemukseräisesti lisäämällä valmiin muodon profiilikoordinaatteihin noin 0,35 - 0,50 millimetrin suuruiset työvarat. Roottorin koosta sekä avauskoneesta riippuen terät ovat joko 225 tai 360 millimetriä halkaisijaltaan ja saattavat sisältää yli 100 teräpalaa.



KUVIO 12. Luistin muodon avausta Holroyd 2A avauskoneella (kuva: Jali Leppälä)

Muodon avaus tehtiin Holroyd 2A-koneilla (Holroyd precision), jotka ovat hieman modernisoituja manuaalikoneita. Koneille tehtiin asetuskortit, joihin laskettiin tarvittavat asetukset.

Prototyyppien profiilikuvien ja olemassa olevien roottoreiden profiilien sapluunoita vertailemalla päädyimme käyttämään EK100-roottoreiden teriä, joita valmistimme vielä muutama vuosi sitten.

Avausterän profiilin x_0 -linja on kyseisessä koneessa oltava 48 millimetrin etäisyydellä koneen karasta, mikä tässä tapauksessa saavutettiin 35/30mm vahvaisilla välirenkailla. Alarenkaan tehtävä on varmistaa, etteivät avausterän kiinnitysmutterin kierteet pohjaa.

Ruuviroottorin nousupyörien laskeminen halutulle nousulle voidaan tehdä vaiheittain seuraavasti:

Jakopyöran hammasluku	60
Roottorin nousu	248,88

Lavennetaan kokonaisluvuiksi x100	6000
	24888

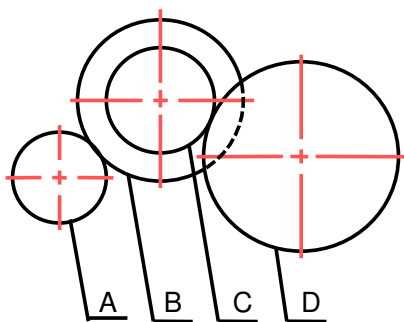
Jaetaan alkutekijöihin	$\begin{array}{cccccccccccccccc} 2 & \times & 2 & \times & 2 & \times & 2 & \times & 3 & \times & 5 & \times & 5 & \times & 5 \\ \hline & & 2 & \times & 2 & \times & 2 & \times & 3 & \times & 17 & \times & 61 \end{array}$
------------------------	---

Supistetaan	$\begin{array}{cccccccccccc} 2 & \times & 2 & \times & 3 & \times & 5 & \times & 5 & \times & 5 \\ \hline & & 2 & \times & 3 & \times & 17 & \times & 61 \end{array}$
-------------	---

Kerrotaan	$\begin{array}{cc} 20 & \times & 75 \\ \hline 102 & \times & 61 \end{array} = \begin{array}{cc} A & \times & C \\ \hline B & \times & D \end{array}$
-----------	--

Nousupyörien laskemisessa on seuraavat koneen asettamat rajoitukset:

- $A + B + C + D > 216$
- $A + B > C + 23$
- $C + D > B + 42$
- Suurin mahdollinen nousupyörä = 105

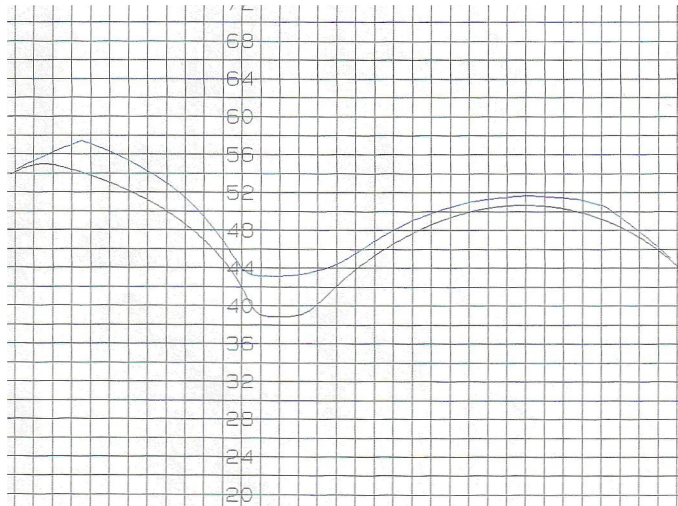


KUVIO 13. Nousupyörien asennuskaavio (Avausvaiheen jyrsinkortti)

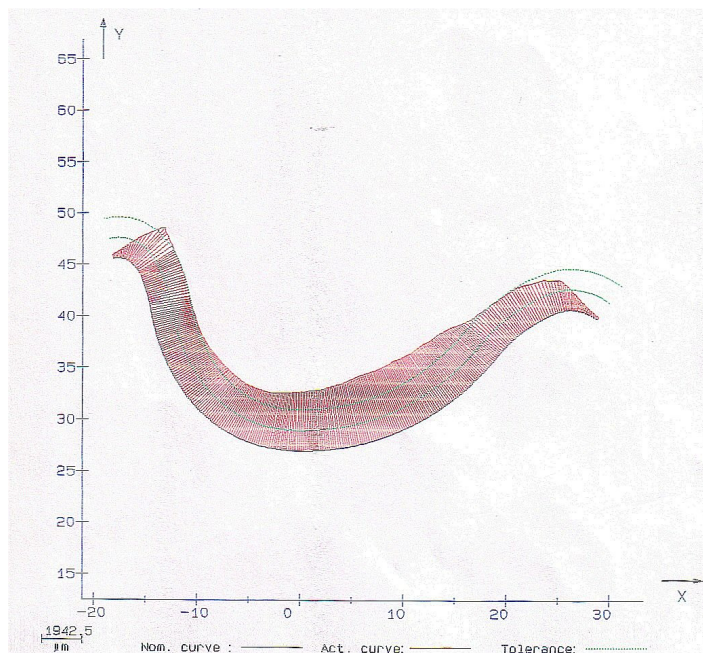
Monissa tapauksissa täysin oikeaa nousua ei pystytä toteuttamaan olemassa olevilla tai mahdollisilla nousupyörillä. Siinä tapauksessa nousua pienennetään tai suurennetaan sadasosa- tai tuhannesosamillimetri kerrallaan kunnes nousu saadaan jaettua sopivasti kerrottavissa oleviin alkutekijöihin. Tässä työvaiheessa pienellä nousun poikkeavuudella ei ole merkitystä.

Muodon avausjyrshintä suoritettiin juhannusviikolla heti sorvauksen jälkeen. Kuten etukäteen oli jo tiedossa, muotoa ei saatu avattua kovin lähelle normaaleja viimeistelyvaroja avausterien erilaisen profiilin vuoksi. Muodon kylkien saavuttaessa noin 0,5 milli-

metrin viimeistelyvaran, muodon pohjalle jäi vielä muutamia millimetrejä ylimääräistä. Ensimmäiset roottorit avattiin varoen menemästä liian syvälle. Kuvioiden 14 ja 15 ensimmäisten roottoreiden mittaustulosten jälkeen ruuviroottorissa oltiin hyvin lähellä maksimisyvyyttä, vaikka pohjalle jäi noin neljä millimetriä. Luistiroottorissa pystyimme ajamaan huomattavasti syvemmälle ja pääsimme ruuviroottoria lähemmäksi työvoiroissa. Molemmissa roottoreissa myös haluttu nousu toteutui toleranssien sisälle.



KUVIO 14. Ruuviroottorin avatun uran poikkileikkauksen vertailu lopulliseen muotoon. Ruudukon viivojen väli on kaksi millimetriä



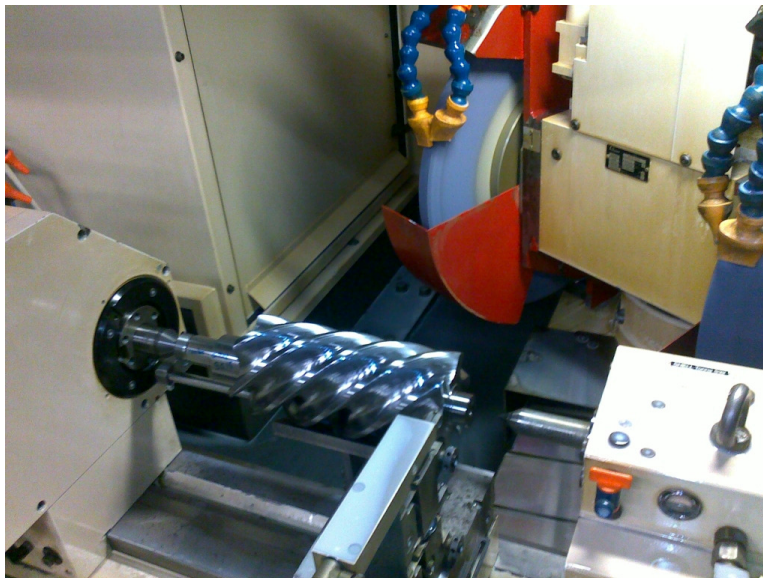
KUVIO 15. Luistiroottorin avatun uran poikkileikkauksen vertailu lopulliseen muotoon. Viivojen väli on yksi millimetri

4.4 Pyöröhionta

Ensimmäisessä viimeistelytyövaiheessa eli pyöröhionnassa roottoreista hiotaan akselit, olakkeiden päädyt ja muodon harja. Roottoreiden heitot kärkien välissä saavat olla enintään 0,15 millimetriä ennen pyöröhiontaa. Tätä pienemmät heitot saadaan oikaistua ilman, että mihinkään jää raakaa pintaa.

Uusia kiinnittimiä ei tarvittu tässä vaiheessa, sillä kappale pyörii kärkien välissä ja kiinnitys on käytännössä samanlainen roottorista riippumatta. Kappaleen pyöritys eli veto tapahtuu keskiöreikien ympärillä olevista kahdesta vetoreiästä. Studer-pyöröhiomakoneessa (Studer) on vastaavasti jousikuormitteinen vetolevy kahdella vetoreikää vastaavalla tapilla. Työvaihetta varten piirrettiin vaihekuvat.

Kappaleet hiottiin (kuvio 16) Studer-pyöröhiomakoneella. Sorvausvaiheessa ilmenneet mittaongelmat tuottivat vaikeuksia myös pyöröhionnassa. Muutamien roottoreiden akselien pituusmittoja ei saatu täysin mittatoleranssien sisälle. Poikkeavat kappaleet merkittiin erikseen seuraavaa työvaihetta varten. Ruuviroottoriin imupäähän suunniteltuja vetoreikiä ei pystytty hyödyntämään kuten oli suunniteltu. Tästä johtuen lopulta sekä ruuvi- että luistiroottorit vedettiin muodon pohjalta ja ajettiin tästä syystä kahdessa eri vaiheessa, pää kerrallaan.



KUVIO 16. Luistiroottorin kiinnitys Studer-pyöröhiomakoneessa (kuva: Jali Leppälä)

4.5 Muodon viimeistely

Prototyyppien muodon viimeistelyä varten suunniteltiin ja tilattiin tarvittava kiinnitin jo toukokuussa. GD4-ruuviroottorin prototyypille ei ollut talon sisällä sopivaa hydraulikkavetäjää ja oikean vetäjän toimitus- ja valmistusaika olisi ollut noin 10 viikkoa. Suunnittelimme siis hydraulikkavetäjään väliholkin, jotta saimme vetäjän sisähalkaisijan sopivaksi roottorin koneeseen kiinnitystä varten. Holkin toimitusajaksi vahvistettiin 4 viikkoa.

Prototyyppien ja muidenkin pienien roottoreiden viimeistely tehdään Holroyd TG150E (Holroyd precision) muodon viimeistelykoneella, joita Tampereen tehtaalla on kaksi kappaletta. Työkaluprofiilin luomiseksi koneelle, toukokuun lopulla ohjelmassa oli viikon mittainen HPMS-koulutus Holroydin tehtaalla Englannissa, Milnrowssa. HPMS eli Holroyd profile management software on ohjelmisto, jolla voidaan tehdä roottoreiden profiilikoordinaateille erilaisia tarkastuksia ja muutoksia sekä luodaan Holroyd TG150E-koneelle tarvittavat profiilitiedostot. Olimme koulutukseen mukaan GD4-roottoreiden koordinaatit sekä muut tarvittavat tiedot. Koulutusviikon aikana kouluttajamme Dan Davey kävi vaihe vaiheelta läpi tarvittavat tarkistukset ja muutokset, joita profiilikoordinaateille tehdään ennen muotohiontaa.

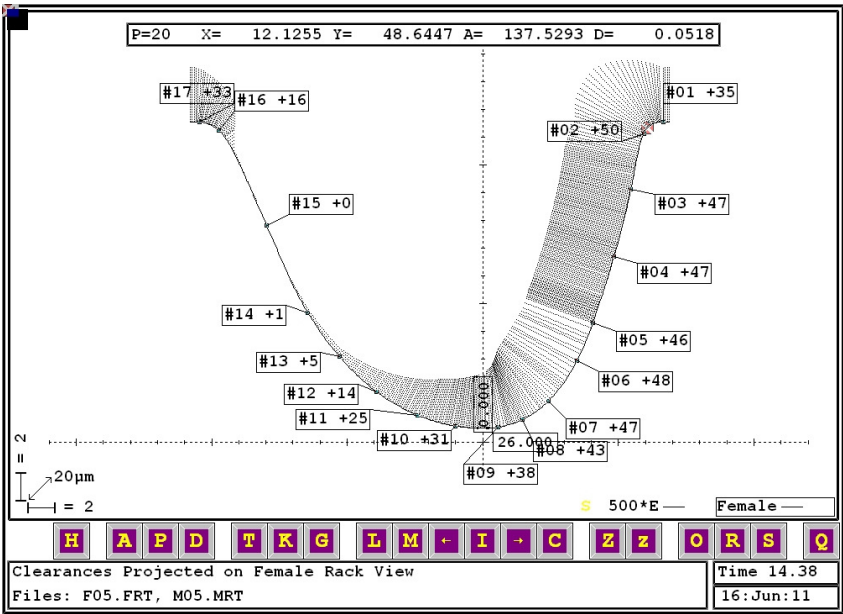
Suunnitelmissa oli, että koulutusviikon aikana luodut GD4-profiilitiedostot olisivat hyödynnettävissä pienin muutoksin muodon viimeistelyyn. Englannista palattuamme GD4-roottoreiden profiilikoordinaatteihin tuli kuitenkin muutoksia ja suurimpana muutoksena aikaisempaan tietoon tuli, että prototyyppejä tehtäisiin kahdella eri profiililla: variant 1 ja 2. Profiilitiedostojen luominen koordinaattipisteistä oli siis aloitettava alusta ja suoritettava molemmille profiiliversioille erikseen.

4.5.1 Työkaluprofiilin luominen HPMS-ohjelmalla

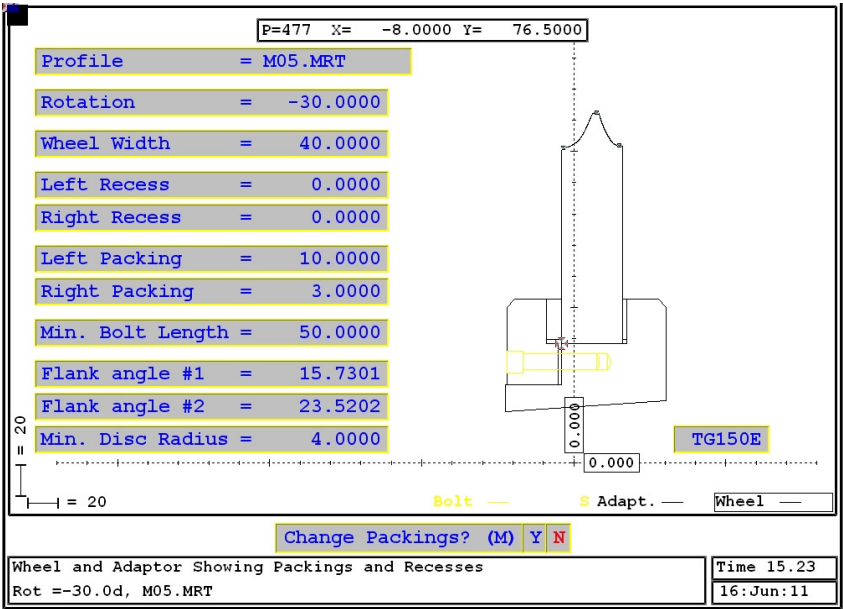
Profiilin luominen on aikaa vievää, tarkkaa ja osittain erittäin hankalaa työtä. Erilaisia tarkistuksia ja pieniä profiilin muokkauksia tehdään useampaan kertaan, jotta lopputuloksesta saadaan hyvä ja ennen kaikkea hiottavissa oleva. Ohjelma ei ole erityisen käyttäjäystävällinen ja itse ohjelman hankaluus tuo työhön omat haasteensa.

Työkaluprofiilin luominen yksinkertaistettuna TG150E-koneelle HPMS-ohjelmalla on esitetty seuraavassa (HPMS operating manual 2010):

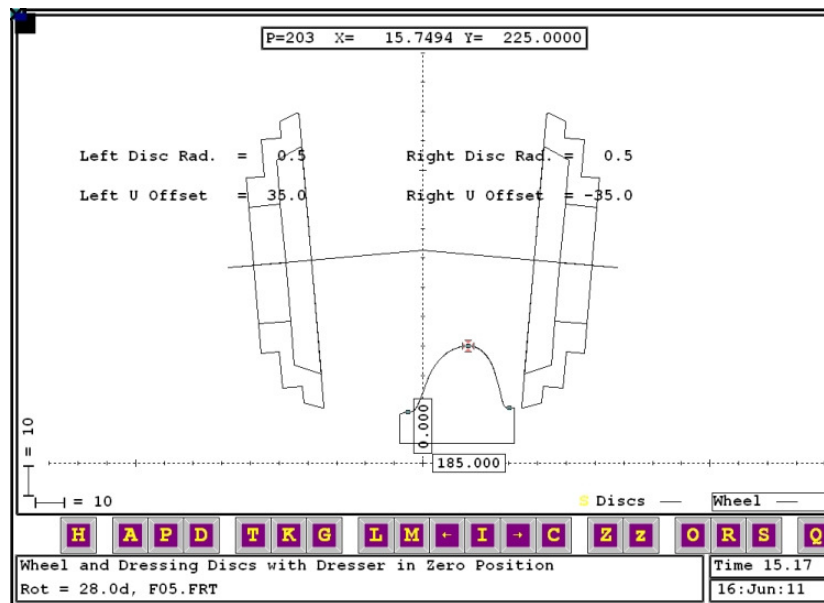
1. Luetaan x- ja y-koordinaatit tekstitiedostosta, profiili muodostuu yleensä noin 300-500 koordinaatista.
2. Käännetään profiilia siten, että muodon pohja on X_0 -pisteessä.
3. Tarkastetaan, että profiilin jyrkkä ja loiva kylki on oikein päin, käännetään tarvittaessa peilikuvaksi.
4. Lisätään tarvittaessa pistetiheyttä, mikäli profiilissa on liian pieniä säteitä.
5. Lisätään roottoreihin halutut välykset, mikäli niitä ei ollut koordinaateissa valmiiksi (kuvio 17).
6. Lisätään profiilin päihin muodon harjan väistöt.
7. Käännetään koordinaatit työkalukoordinaateiksi ja tarvittaessa käännetään profiilia työkalussa, että saadaan kiven kylkikulmat eli Flank angle #1 ja #2 (kuvio 18) mahdollisimman lähelle toisiaan. Alle neljän asteen kulmassa olevia kylkiä ei pystytä käytännössä timantoimaan kiven muotoon.
8. Lasketaan tarvittavat välirenkaat ja tarkastetaan, että muoto mahtuu kiveen profiilin käännön jälkeen.
9. Tarkastetaan, että kohdassa seitsemän tehty työkalumuunnos ei aiheuttanut epäjatkuvuuksia profiiliin, korjataan tarvittaessa.
10. Varmistetaan, että profiili mahtuu timanttilaikkojen toimintasäteelle (kuvio 19).
11. Muodon pienin säde on oltava suurempi kuin timanttilaikan kulman pyöristys, muokataan profiilia tarvittaessa.
12. Varmistetaan, ettei kivi osu hydraulikkavetäjään tullessaan muodosta ulos.
13. Lasketaan mittakärjen päälle sopiva halkaisija, ruuviroottorille yleensä 1 millimetri ja luistiroottorille 6 millimetriä.
14. Undercutting-tarkistuksessa lasketaan, että yksittäinen kiven piste ei leikkaa useampaa kohtaa roottorissa. Usein roottorin profiilia joudutaan muokkaamaan tuhannesosa- tai kymmenestuhannesosamillimetrejä yksittäisissä pisteissä.
15. Lopuksi vielä tarkistetaan roottorivälykset, jotka usein hieman muuttuvat aikaisemmissa vaiheissa. Välyksiä muokataan tarvittaessa, jonka jälkeen profiileille on tehtävä jälleen useita tarkistuksia.



KUVIO 17. Roottoriparin välykset tuhannesosa millimetreinä, kuvattuna luistiroottorin nousun suuntaisesti



KUVIO 18. Ruuviroottorin profiilia käännetty -30 astetta



KUVIO 19. Hiomakiven muodon mahtuminen timanttilaikkojen toimintasäteelle

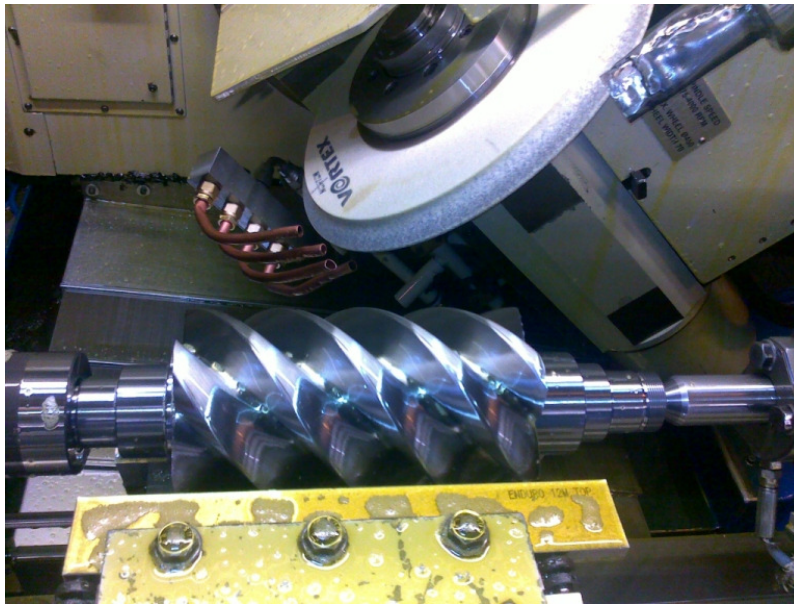
4.5.2 Roottoreiden viimeistelyhionta

Prototyypiroottoreiden viimeistelyhionta oli aikataulutettu juhannuksen jälkeiselle viikolle, mutta työvaihe päästiin aloittamaan jo viikkoa aikaisemmin. Avausjyrsinnän jälkeen roottoreissa oli vielä huomattavan paljon ylimääräistä työvaraa, joten ensimmäisessä vaiheessa roottoreille tehtiin ylimääräinen rouhintahionta oikeille työvaroilta. Tässä kului noin puoli tuntia ylimääräistä aikaa roottoria kohden.

Ensimmäisistä valmiista ruuvi- ja luistiroottoreista tehtiin master-roottorit, jotka mitattiin koordinaattimittauskoneella; master-roottoreiksi valittiin aikaisemmista työvaiheista poikkeavina eteenpäin laitettut roottorit, sillä akseleiden pituuksilla ei ole merkitystä tähän tarkoitukseen. Näitä mittatuloksia verrataan HPMS-ohjelmalla luotuihin profiileihin ja tehdään Holroyd TG150E-konetta varten vertailutiedosto. Jokaisen sarjan alussa, kun koneelle vaihdetaan asetukset, muotohiomakone mittaa master-roottorin profiilin ja vertaa mittatuloksiaan vertailutiedoston avulla koordinaattimittakoneen tuloksiin. Tämän perusteella TG150E-kone tekee tarvittavat korjaukset profiiliin. Koneelle manuaalisesti tehtäviä asetuksia varten tehtiin asetuskortit.

Kuviossa 20 tapahtuva roottoreiden viimeistelyhionta sujui erittäin hyvin, edellinen roottori mitattiin koordinaattimittauskoneella aina ennen seuraavan aloittamista varmuuden vuoksi. Roottoreita hiottiin sekä variant 1 että variant 2 profiililla tarvittava

määrä onnistuneesti. Erittäin kireästä aikataulusta huolimatta roottorit saatiin valmiiksi noin viikko ennen suunniteltua aikataulua.



KUVIO 20. Ruuviroottorin muodon hionta Holroyd TG150E-koneella. Koneessa käytetään leikkuunesteenä rypsiöljyä (kuva: Jali Leppälä)

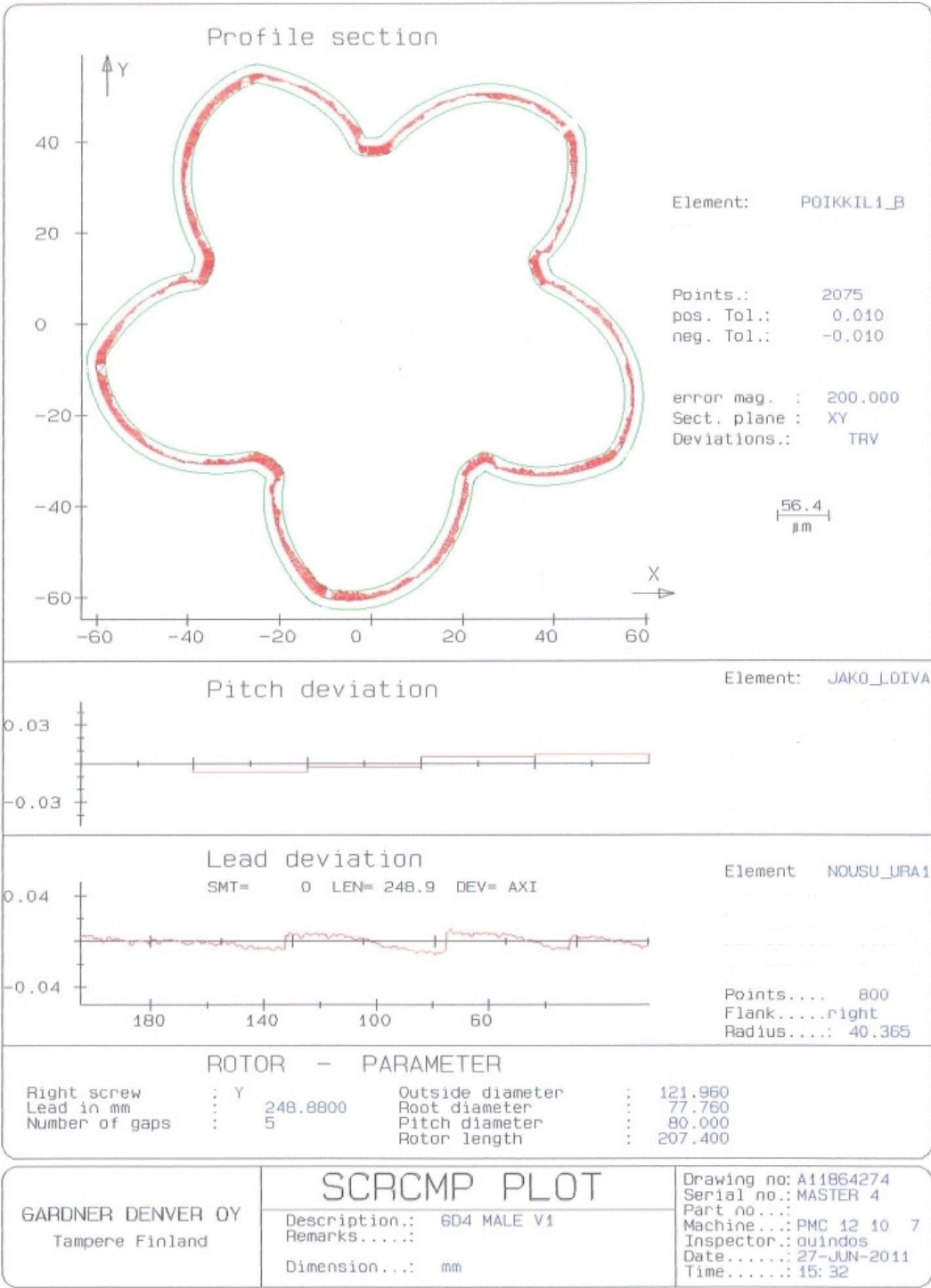
5 LOPPUTARKASTUS

5.1 Koordinaattimittaus

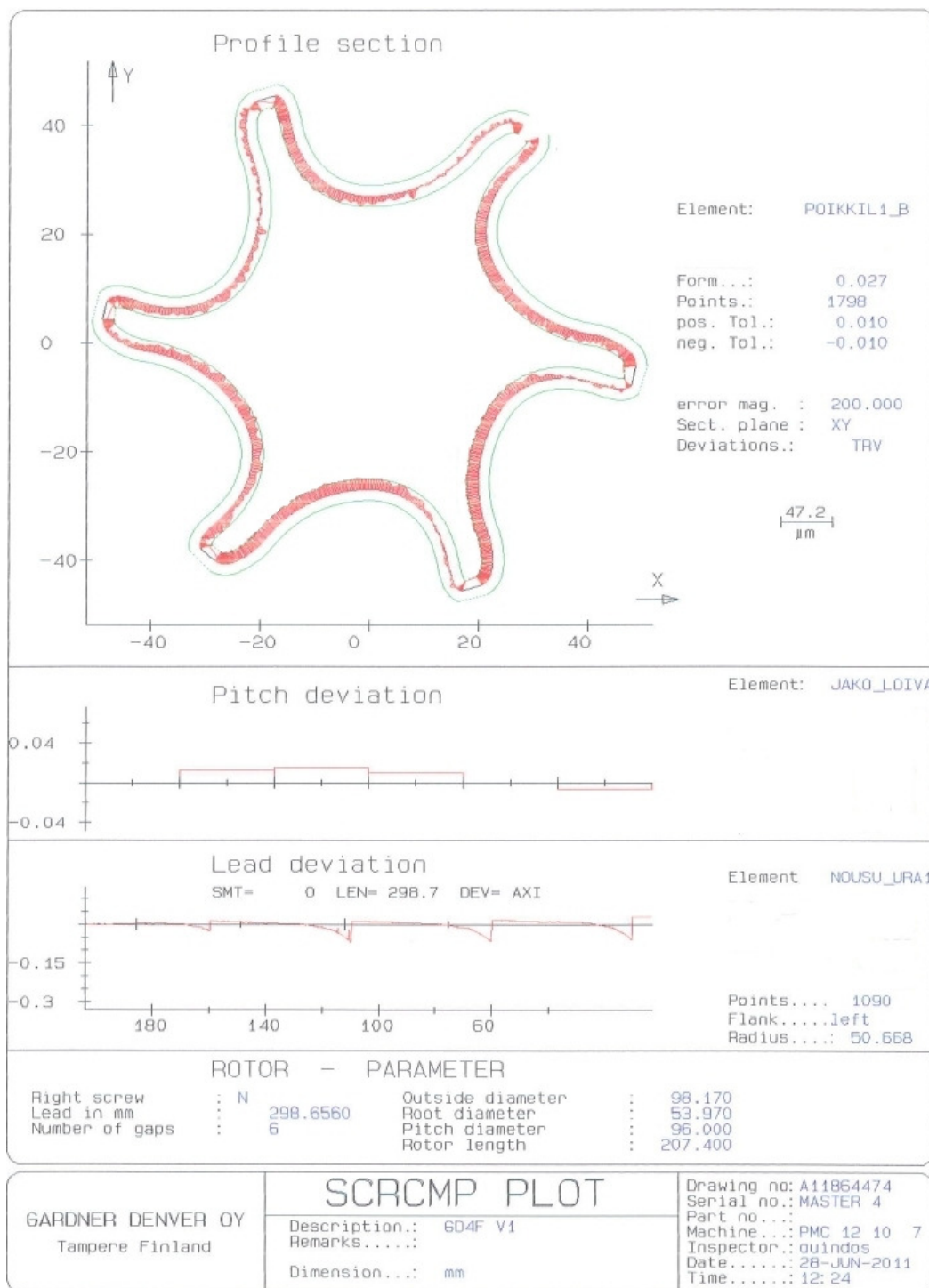
Roottoreiden mittaus (kuvio 21) suoritettiin yksitellen muodon viimeistelyn yhteydessä. Kuvion 22 ruuviroottorin ja kuvion 23 luistiroottorin variant 1 mittaustuloksista voidaan todeta, että roottoreiden muodon toleranssi $\pm 0,01$ millimetriä sekä nousun toleranssi $\pm 0,01$ ruuville ja $\pm 0,015$ luistille toteutuivat erinomaisesti. Muoto pyritään useimmiten ajamaan toleranssin alarajoille, etteivät roottorivälykset ole liian kireitä. Variant 2 roottorit olivat myös annettujen toleranssien mukaisia.



KUVIO 21. Ruuviroottori mittakoneessa (kuva: Jali Leppälä)



KUVIO 22. GD4-ruuviroottorin variant 1 mittaustulokset. Punaisella näkyvä muotoviirhe skaalattu 200-kertaiseksi ja vihreät muotoviivat näyttävät ylä- ja alatoleranssin



KUVIO 23. GD4-luistiroottorin variant 1 mittaustulokset. Punaisella näkyvä muotovirhe skaalattu 200-kertaiseksi ja vihreät muotoviivat näyttävät ylä- ja alatoleranssin

5.2 Välystarkastelu

Valmiille roottoreille suoritettiin vielä välystarkastelu. Tarkastuspukkiin säädetään oikea keskiöetäisyys ja roottorit kiinnitetään kärkien väliin. Välys mitataan eri kohdista mittaliuskoilla. Kyseistä välystarkastelua ei vaadittu kappaleille, joten erillisiä mittauspöytäkirjoja ei laadittu. Tarkastelulla halusimme varmistaa, että suunnitellut roottorivälykset toteutuivat.

5.3 Koekäyttö

Roottorit lähetettiin viikolla 26 mittaustulosten kanssa lopputestejä varten Simmerniin, jossa roottoreille koneistetaan vielä runko-osat. Yksikköjen kokoonpanon jälkeen niille suoritetaan koekäyttö, jonka tulokset saadaan myöhemmin syksyllä. Koekäytön perusteella myös lopullinen roottoriprofiili päätetään sarjatuotantoa varten.

6 HAVAITUT ONGELMAT JA MUUTOKSET SARJATUOTANTOON

Muutamaan roottoriin jääneen raa'an pinnan vuoksi tulevien aihoiden halkaisijaa päädyttiin kasvattamaan viisi millimetriä eli ruuviroottori tehtäisiin jatkossa 130- ja luistiroottori 105 millimetriä vahvasta pyörötangosta. Kasvatetulla aihion halkaisijalla pääsemme myös ihanteellisempiin lastun vahvuuksiin sorvatussa. Aihiot tullaan lisäksi tilaamaan jatkossa sahatusta pyörötangosta ilman esikoneistusta. Sahattuihin aihioihin jätetään noin kolme millimetriä pituusmittaan työvaraa sorvausvaihetta varten. Muutos kasvattaa hieman Mazak Integrex-monitoimisorvilla kuluvaa sorvausaikaa, mutta ei lisää työvaiheita, sillä aihoiden päät tasataan ja keskiöidään sorvausvaiheessa. Aihoiden ostaminen ilman esikoneistusta vähentää ulkoa ostettavaa koneistusta. Kun päät tasataan ja keskiöidään sorvausvaiheessa, roottoreiden pituusmitat ja heitot ovat paremmin hallittavissa. Tämä muutos vaatii sorville hankittavaksi leuka-aihiot, jotka sorvataan oikeille halkaisijoille.

Muodon avaukseen tullaan syksyllä, lopullisten roottoriprofiilien varmistuttua, suunnittelemaan ja tilaamaan omat avausterät GD4-roottoreille. Nykyiset avausterät jättävät noin 0,5 millimetrin hiontavaran viimeistelyyn, mutta tarkoitus on optimoida GD4-avausterät 0,35 millimetrin työvaroille. Pienemmillä työvaroilla tulemme saamaan muutamman minuutin pois muotohionnan työkierroista.

Studer-pyöröhiomakoneelle suunnittelimme jo valmiiksi vetolevyn GD4-ruuviroottoria varten. Lisäksi roottorin päässä olevien vetoreikien halkaisijaa ja etäisyyttä muutetaan vetolevyä vastaavaksi ja ne tehdään jatkossa roottorin painepäähän. Vetoreikien ja -levyn muutos vaatii myös roottorin painepään keskiöön sekä vetolevyn keskireikään sopivan kärjen. Muutosten jälkeen pystymme hiomaan roottoreiden molemmat päät kerralla, ilman kappaleen kääntämistä. Muodon viimeistely ei vaadi muutoksia. Ainoastaan työkaluprofiilit menevät uudelleen tehtäväksi HPMS-ohjelmalla, mikäli roottoreiden profiileihin tulee prototyyppi-sarjan jälkeen muutoksia. Uusien avausterien myötä GD4-roottoreiden muodon hiominen tulee merkittävästi tehostumaan.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön aiheena ollut GD4-prototyyppiroottoreiden läpivienti alusta loppuun oli tärkeä työnäyte koko Tampereen tehtaan osaamisesta. Prototyyppien laadukas onnistuminen annetussa aikataulussa lisää huomattavasti mahdollisuuksiamme saada GD-sarjan myöhempiä prototyyppejä sekä sarjavalmistusta tehtaallemme.

Opinnäytetyön ensisijaisen tavoitteen mukaisesti, työssä suunniteltiin tarvittavat menetelmät ja kiinnittimet prototyyppien valmistukseen. Roottoreiden muodon viimeistelyyn vaadittavan HPMS-ohjelman opettelu ja käyttö antaa hyvät lähtökohdat toteuttaa vastaavia projekteja myös tulevien uusien roottoreiden parissa. Valmistukseen tarvittavien kiinnittimien suunnittelu ja itse valmistuksen vaiheistaminen onnistui erittäin hyvin.

Prototyyppien menetelmien alusta loppuun asti vieminen oli suuri haaste. Työpaikanvaihdosten ja eläkkeelle jäämisten seurauksena, ei Tampereen tehtaalla ole ollut viimeiseen vuoteen päätoimista roottoripuolen menetelmäsuunnittelijaa. Lähes kaikki projektin vaiheet oli siis aloitettava nollatilanteesta.

Toisena tavoitteena oli menetelmien kehitysehdotuksien laatiminen sarjatuotantoa varten. Jokaiseen työvaiheeseen jäi jotain kehitettävää ja kehitysehdotuksia tullaan syksyn 2011 aikana toteuttamaan. Joitakin suunnitelmia ei esimerkiksi voitu toteuttaa prototyyppien vaatimassa aikataulussa johtuen kiinnittimien pitkistä toimitusajoista. Kun GD4-roottoreiden sarjatuotanto käynnistyy vuoden 2012 alussa, tarvittavat työkalut ja kiinnittimet ovat valmiina.

LÄHTEET

Airila, M., Hallikainen, K., Kääpä, J. & Laurila, T. 1983. Kompressorikirja. Helsinki: Korpivaara Oy Hydor Ab, ISBN 951-99433-8-2). 30-34.

GD-akatemia. 2011. Koulutusmateriaali.

Holroyd precision. 2011. Luettu 10.7.2011.
<http://www.holroyd.com/holroyd-precision/machines/grinders-helical.php>

HPMS operating manual. 2010. Ohjekirja.

Hyväri, H. 2005. Teknillinen piirustus. Luettu 13.9.2011
www.students.oamk.fi/~r5kumi01/Tekn.%20piir.%20luentorunko.ppt

Piironen, K. Tuotantopäällikkö. Gardner Denver Oy. Keskustelut 7/2011 - 8/2011.

Studer. 2011. Luettu 5.8.2011.
<http://www.studer.com/redwork/do.php?layoutid=405&node=2141638686&language=2&fid=>

Tibnor. 2011. Erikoisteräkset. Luettu 15.7.2011.
<http://www.tibnor.fi/web/Erikoisterakset.aspx>. 156.

Wihuri työstökoneet. 2011. Luettu 12.7.2011.
http://www.machinetools.wihuri.fi/mazak_koneet/monitoimikoneet/fi_FI/integrex_iv/

Öhman, H. 2001. Screw compressor rotor profile design, why and how? Konferenssi-kansio.